

# 低周波域における木造家屋の外周壁遮音性能に関する研究

Study on low-frequency sound insulation performance of wooden house façades

学籍番号 47-177647  
氏名 劉 金雨 (Liu, Jinyu)  
指導教員 佐久間 哲哉 教授

## 1. 序論

**研究背景** 一般に 100 Hz 以下の低周波音の可聴音と超低周波音を含む音波を低周波音という。近年、風車等の施設及び家庭用設備機器を発生源として、100~200 Hz も含む低周波騒音に対する苦情件数が急増しており、社会問題となっている。低周波音を制御するためには、音響伝搬メカニズムを把握する必要があるが、低周波音の音響透過・伝搬現象は多くの複雑な要素が関係しており、波動的性質の影響も大きく、遮音性能の確保することが困難である。また、住宅側での効果的な遮音対策に関する知見が少ないことが実情である。

居住者のシェルターとして、木造住宅は、外周壁が軽量の構造であるため、低周波領域の遮音性能を十分に確保できないことが大きな問題となっている。その対策の一つとしては、壁・天井・窓の重量化が行われているが、このような各種建築部材の遮音性能は、実験室及び現場測定における測定の不確かさから 100 Hz 未満を測定対象外としており、低周波音に対する遮音測定データ自体は存在しない。近年、ISO 16283-3 規格では低周波域 (50~80 Hz 帯域) の測定方法 (「コーナー法」) が導入されているが、国内で検証事例が殆ど見られず、測定精度の検証も不十分である。そのため、重量化によ

る防音対策は質量則を仮定した単純な効果推定に基づくものであり、実際の効果は不明である。尚、低周波音に対して部位ごとの遮音性能を把握することは、現場ごとに制限が様々あるため難しく、音響透過のメカニズムについても知見が極めて少ない。

**研究目的** 以上の背景を踏まえ、低周波域における木造家屋の外周壁遮音性能に関して、性能評価の妥当性・信頼性の向上と防音対策の合理化を目的として、主に以下の 3 点について実験・解析を通して取り組む。

- ① 低周波域における外周壁遮音性能の現場測定法の確立
- ② 木造家屋の低周波防音対策効果の検証
- ③ 屋外から室内への低周波音響透過現象の解明

## 2. 低周波域における外周壁遮音性能の現場測定法に関する実験的検討

### 2.1 実験環境

木造軸組工法 1 階建て 6 畳 (容積: 約 20 m<sup>3</sup>) 2 間の試験家屋 (Fig.1) を建設した。二室の平面配置は回転対称とし、各室に遮音性能の異なるアルミ製引違いテラス窓を設置した。室 A において単板ガラス 5mm 厚の普通サッシ、室 B において複層ガラス総厚 10mm の防音サッシを使用した。外壁および屋根・天井の面密度は 25kg/m<sup>2</sup> 程度 (支持材含む) の軽量仕様とした。

## 2.2 測定方法

Fig. 2 に示す木造試験家屋の室 A に窓面 45 度方向 8m 離れのスピーカから音を放射し、外周壁の遮音測定を実施した。室内域に渡る 0.45 m 間隔とし、壁面近傍に 168 点(境界面離れ 0.163~0.225 m)、内部に 72 点(境界面離れ 0.5 m 以上) の合計 240 点を配置し、格子各点上の音圧レベルを計測した。

## 2.3 分析方法

低周波測定法に従い、式 (1) により室内平均音圧レベル  $L_{2,LF}$  はを算出する。

$$L_{2,LF} = 10 \lg \left( \frac{2}{3} 10^{L_{2,5pt}/10} + \frac{1}{3} 10^{L_{2,Corner}/10} \right) \quad (1)$$

ここで、 $L_{2,5pt}$  は室内 5 点のエネルギー平均レベル、 $L_{2,Corner}$  は隅部レベルである。

従来法では、室内中心部に測定点位置の選択によるばらつきを定量的に明らかにするため、Fig. 2 に各ゾーン (Z1~Z5) から 5 点を選択し、その平均音圧レベル  $L_{2,5pt}$  を用いた。但し、5 点の組合せに関しては、X 方向では異なる面、Y,Z 方向では各面上で少なくとも 1 点があり、かつ 3 点以上が同一面にない条件とし、さらに任意 2 点の距離が 0.7m 以上を満たす合計 4752 通りとした。

低周波測定法では、ISO を準じて、コーナー 4 点以上 (天井と床面各々 2 点) の選択に関して合計 36 通りとした。コーナー 4 点の最大値を用いた室内平均レベル  $L_{2,LF}$  を算出する。また、選択に伴う不確かさを抑制するためにコーナー全 8 点の最大値 ( $L_{cn,max}$ ) とエネルギー平均値 ( $L_{cn,ave}$ ) を用いて室内平均レベル  $L_{2,LF,max}$  及び  $L_{2,LF,ave}$

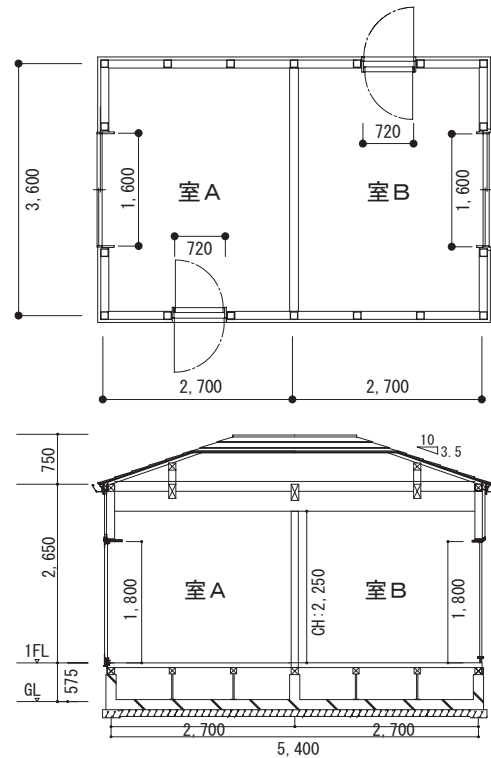


Fig. 1 The mock wooden house.

を算出する。なお、室内平均音圧レベルの基準値として、全 240 点のエネルギー平均値 ( $L_{2,all}$ ) を算出する。一方、遮音性能指標として、下式 (3) で表される規準化室内外音圧レベル差  $D_{free,n}$  の算出方法について、室内残響時間の不確かさ及び室内吸音面積の影響に関する検証を行った。

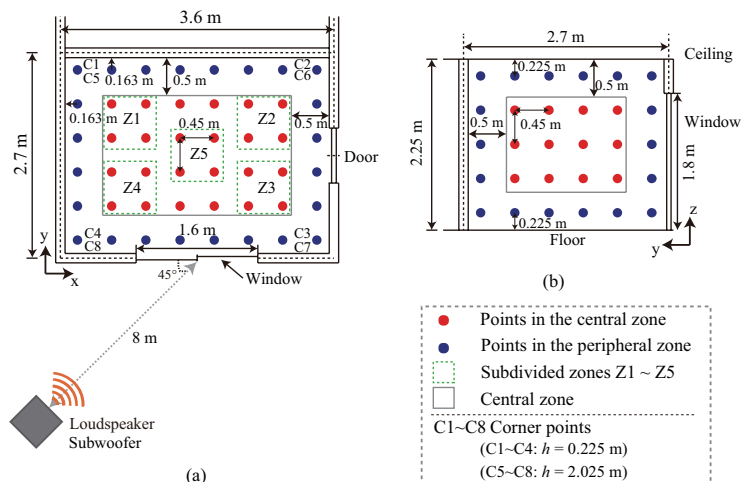


Fig. 2 Arrangement of microphones inside the room: (a) plan; (b) section.

$$D_{\text{free}} = L_{\text{free}} - L_{2,\text{LF}} \quad (2)$$

$$D_{\text{free},n} = D_{\text{free}} - 10 \log_{10} \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (3)$$

ここで、 $L_{\text{free}}$  は屋外半自由音場の音圧レベルである。規準吸音面積  $A_0 = 10 \text{ m}^2$ 、等価吸音面積  $A$  は、Sabine 残響式に基づき残響時間の実測値から算出する。

## 2.4 実験結果と考察

### 2.4.1 室内平均音圧レベル算出の検証

$L_{2,5\text{pt}}$  全 4752 通りの算術平均値について、 $L_{2,\text{all}}$  に対するレベル差及び内部 5 点選択に伴う 95%信頼区間を Fig. 3(a)に示す。315 Hz 以上ではレベル差が 1 dB 以下となり ISO 従来法の有効性が確認できた一方、250 Hz 以下では最大 4 dB の低下が現れた。これに対して Waterhouse 補正を行った  $L_{2,\text{WH}}$  は 80 Hz 以下では  $L_{2,\text{all}}$  より大幅に過大評価された。さらに、ISO 低周波測定法を用いた  $L_{2,\text{LF}}$  は、250 Hz 以下では 1~3 dB 高く評価され、中央 5 点の選択に伴うばらつきもあまり改善されていない。

Fig. 3(b)に示すコーナー 8 点の最大・平均値を用いた補正の比較結果について、 $L_{\text{cn},\text{ave}}$  を用いた方が 2 dB 未満となり、 $L_{2,\text{all}}$  推定に相当である可能性が示唆された。また、 $L_{2,5\text{pt}}$  のばらつきがかなり減少されることがわかった。

### 2.4.2 室内吸音面積の検証

室内各辺中央に辺長 600 mm 吸音材を 4 個または 8 個配置した条件 A1, A2 を追加し、各条件における  $D_{\text{free},n}$  を Fig. 4 に示す。全体傾向として、50~1k Hz 帯域では 3 条件間で 3 dB 以内の差に収まっているのに対して、低い帯域では差が顕著に現れており、室内最低固有周波数以下では等価吸音面積の規準化は不相当であったと考えられる。

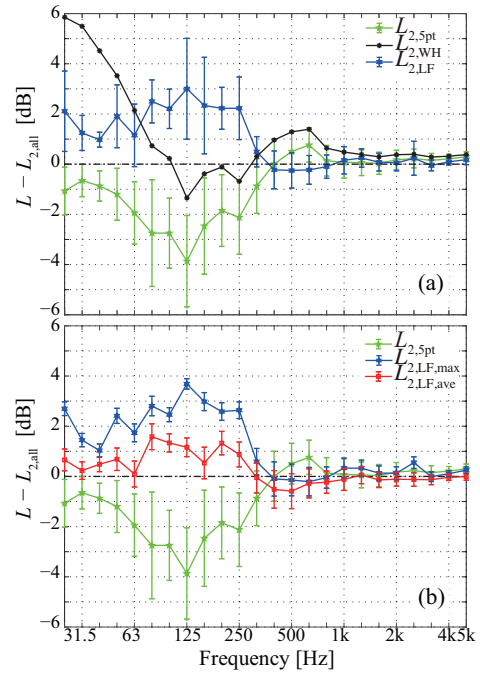


Fig. 3 Average SPLs calculated with: (a) the ISO and  $L_{2,\text{WH}}$ ; (b)  $L_{\text{cn},\text{max}}$  and  $L_{\text{cn},\text{ave}}$ . Bars represent 95% confidence intervals.

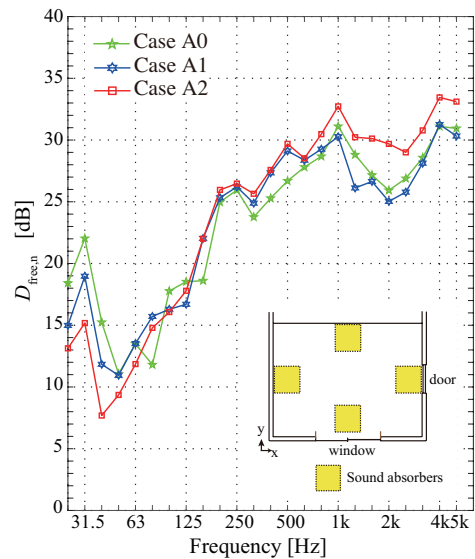


Fig. 4  $D_{\text{free},n}$  for Case A0, A1, A2.

## 3. 低周波域における木造家屋の防音対策効果に関する実験的検討

### 3.1 低周波防音対策の概要

木造住宅における低周波防音対策の効果検証を目的として、新設の木造試験家屋に

加えて、既存の木造家屋・RC住宅及び遮音実験室における遮音実験を実施した。一般的な防音対策として、実際の工法を想定した外壁や天井の重量化、二重窓の設置を実施し、低周波域におけるそれらの組合せによる効果を検証するとともに、外壁構造、換気口、窓シャッターの影響についても補足的に検証した。

## 3.2 実験結果と考察

### 3.2.1 二重窓の防音効果

木造試験家屋の異なる外壁構造 ( $m = 25, 55 \text{ kg/m}^2$ ) 条件で、一重窓 (単板・複層ガラス) を基本条件Case 1a, 1cとして、空気層厚190 mm, 内窓ガラス厚5 mmの二重窓を設定しCase 2a, 2c計4条件で遮音測定を行った。 $D_{\text{free,n}}$ 結果をFig. 5に示す。軽量外壁の場合、160 Hz以下では、外壁の低い遮音性能の影響もあり全条件で3dB以下の小差となった一方、重量外壁の場合、帯域により5 dB以上の改善、一部帯域で改善なし傾向が見られる。また空気層による共鳴透過周波数50 Hz付近で逆に上昇しており、窓サッシ全体の剛性が影響したものと考えられる。

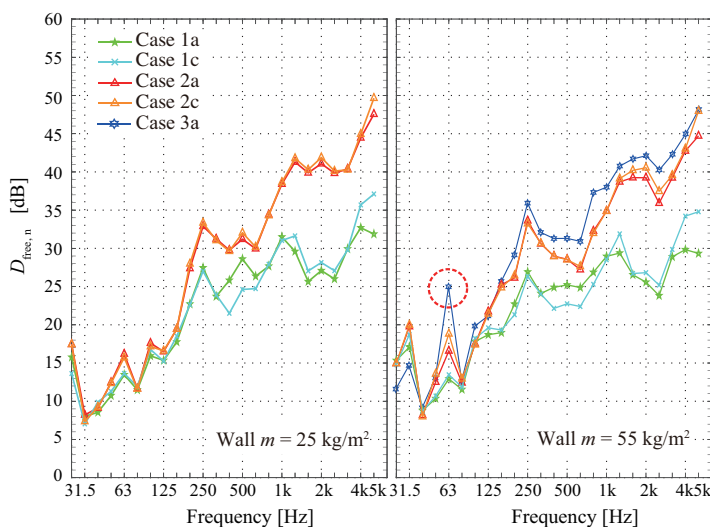


Fig. 5  $D_{\text{free,n}}$  in cases with wall surface density  $25 \text{ kg/m}^2$  and  $55 \text{ kg/m}^2$ .

更に重量外壁の場合に、試験的に内窓を総厚10 mmの複層ガラスとして重量化した条件Case 3aと比較すると、63 Hz帯域においてCase 2cで一重窓では見られない上昇が生じているが、内窓の重量化によってそのピークがさらに6 dB程度も高まっている。このメカニズムの解明は今後の課題である。

### 3.2.2 内壁増し張りの防音効果

一重・二重窓の条件 Case 1a, 2c で家屋の内壁に硬質石膏ボードを2層増し張りする工事前後の  $D_{\text{free,n}}$  の測定値を Fig. 6 に示す。

31.5 Hz 帯域では、内壁増し張りにより 10 dB を上回る遮音性能の向上が見られ、剛性則に従い、家屋壁体の曲げ剛性の増大によるものと考えられる。50~80 Hz の低周波域では、一重窓の場合に内壁増し張りの効果は現れていないのに対して、二重窓の場合には若干の向上が見られる。また、125~160 Hz 帯域では、窓構造によらず内壁増し張りの効果が明確に現れている。このことから、木造家屋における低周波音の遮音対策を検討する際、軽量外壁構造に対して、二重窓の採用と外壁の重量化の両方を行う必要がある。

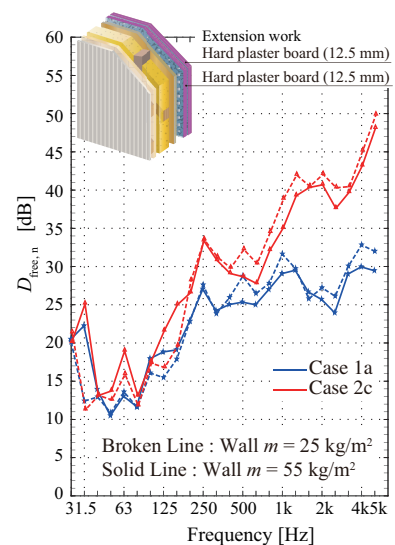


Fig. 6  $D_{\text{free,n}}$  for the light/heavy-weight wall with a single/double window.

るものと考えられる。一方、中高音域では内壁増し張りにより、窓構造によらず遮音効果が低下する傾向が見られる。内壁の表面仕上げが影響した可能性もあるが、現時点で原因は不明である。

#### 4. 低周波音響透過における木造家屋の振動性状の把握

##### 4.1 室内周壁の振動分布計測

木造住宅の低周波域における振動性状の把握を目的として、木造試験家屋の重量外壁構造の場合、窓条件を変化させて、内壁・天井・床及び窓面の振動応答測定を実施した。特に、各部位の振動レベルの比較、二重窓システムの振動挙動について検討した。実験結果はFig. 7~8に示す。結果について、一重窓Case 1の場合、音源正面壁の振動が全体的に大きく、40 Hz以下では窓ガラス面の振動が壁面より明らかに大きい。また、二重窓Case 2の場合、共鳴透過周波数( $f_m$ )付近

で振動のピークが生じ、それ以上では外窓、それ以下では内窓の方が振動が大きい。

#### 4.2 室内音圧計測と数値解析に基づく室内周壁の振動分布推定

第2章の室内音圧計測値を用いて境界要素法に基づく逆音響問題解析を行い、外壁の重量化や二重窓対策による壁面振動・室内音響インテンシティの推定を試みた。各壁面振動の傾向把握及び、室内音場の可視化の可能性が確認された。

#### 5. 外周壁の低周波音響透過に関する理論的・数値解析的検討

##### 5.1 窓から室内への低周波音響透過現象

1次元波動音場モデルに基づき、窓から室内への音響透過現象について理論的考察を行った。次に、木造試験家屋の簡易的な有限要素モデル (Fig. 9) を作成し、窓面を膜要素を適用した音響振動連成解析を行った。解析の基準条件として一重・二重窓のガラス厚は  $t = 5 \text{ mm}$ 、及び二重窓の外窓  $t_1$ ・内窓  $t_2$  の各々の厚さを倍増した場合の  $D_{\text{free}}$  理論・数値解析値を Fig. 11 に示す。両方の傾向は、窓から奥行き方向の固有周波数以下で概ね対応して現れている。また、二重窓による低周波音の遮音対策を検討する際には、共鳴透過周波数と窓から奥行き方向の室内固有周波数に注意すべきであることが示唆された。更に、二重窓の共鳴透過によるディップは理論周波数( $f_m$ )とほぼ一致

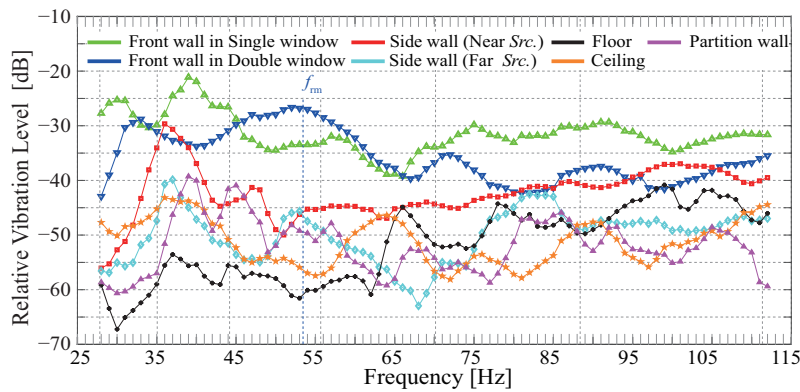


Fig. 7 Energy-average levels on each elements in Case 1 and those on the front wall in Case 2.

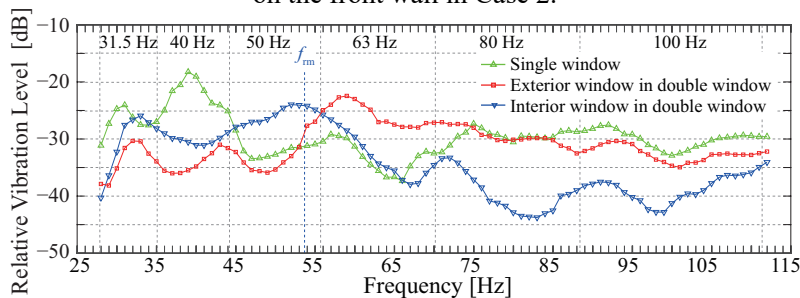


Fig. 8 Energy-average levels for different window glazing.

ス厚は  $t = 5 \text{ mm}$ 、及び二重窓の外窓  $t_1$ ・内窓  $t_2$  の各々の厚さを倍増した場合の  $D_{\text{free}}$  理論・数値解析値を Fig. 11 に示す。両方の傾向は、窓から奥行き方向の固有周波数以下で概ね対応して現れている。また、二重窓による低周波音の遮音対策を検討する際には、共鳴透過周波数と窓から奥行き方向の室内固有周波数に注意すべきであることが示唆された。更に、二重窓の共鳴透過によるディップは理論周波数( $f_m$ )とほぼ一致



しており、室内固有モード現象とはほぼ独立、相互作用は小さいことが確認された。

## 5.2 外壁から室内への低周波音響透過現象

上記の解析モデルに基づき、音源側 2 面の外壁に単純な単板モデルを仮定し、木造試験家屋で行った軽量・重量外壁 2 条件を設定し、外壁重量化・二重窓の複合効果の考察を行った。Fig. 10 に窓面と外壁両方を板要素を適用した場合、一重・二重窓に対して、外壁 2 条件及び剛とした場合の  $D_{free}$  を示す。室最低固有周波数 40~50 Hz で上昇し、窓から奥行き方向の固有周波数 63 Hz では外壁増厚の効果がなく、更に 80~160 Hz 帯域では一重窓の場合は効果が現れていないが、二重窓の場合は 5 dB 程度の上昇が現れており、また剛壁より大幅に低下となっていることが示された。

## 6. 総括

低周波域における木造家屋の外周壁の遮音性能の現場測定法の確立、防音対策及び音響伝搬メカニズムの解明に関する知見が得られた。今後は、木造以外の建築構造や異なる室寸法を対象として、低周波測定法の妥当性に関する追加検証の必要がある。また、外壁の二重構造及び構造部材について詳細な数値解析モデル化を実施し、対策効果の予測精度を向上させる必要がある。

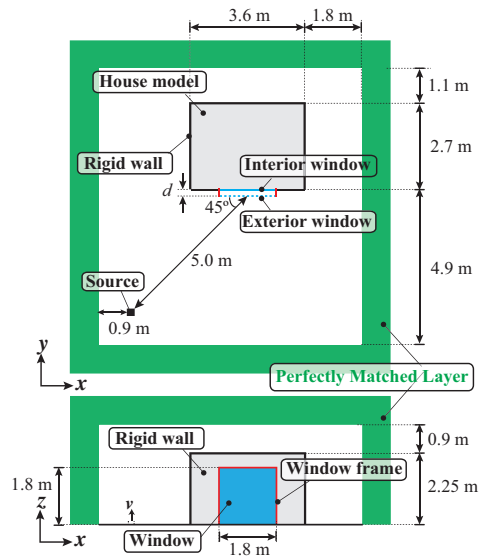


Fig. 9 Numerical model of the wooden house with double window system.

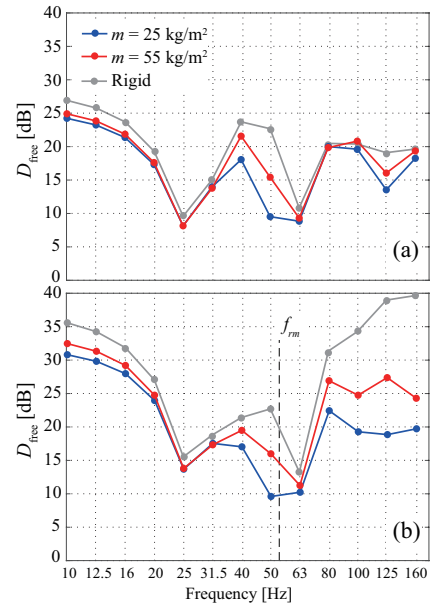


Fig. 10  $D_{free}$  for weighting outer walls with: (a) single; (b) double window.

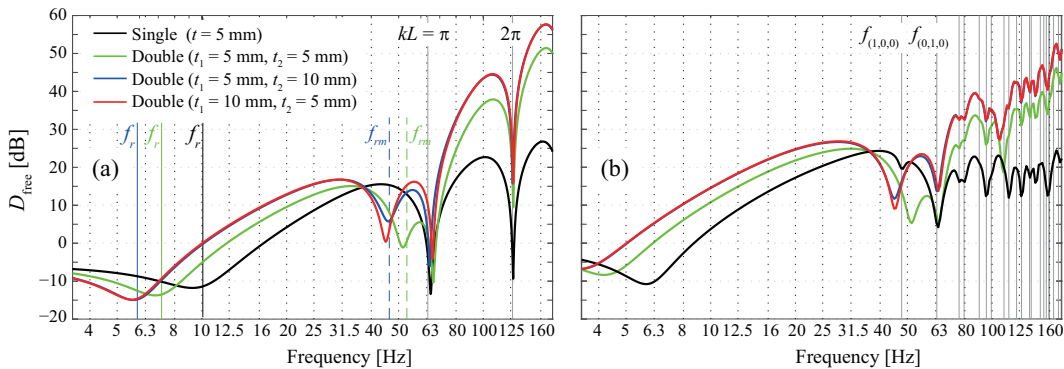


Fig. 11  $D_{free}$  on the effect of glazing thickness: (a) theoretical; (b) numerical model.